第39卷　第5期
2022年9月

干　旱　区　研　究
ARID　ZONE　RESEARCH

Vol. 39　No. 5
Sep.　2022

基于MSWEP降水产品的新疆干旱时空特征分析

王姣妍

（新疆水文局，新疆 乌鲁木齐　830000）

摘　要：由于新疆降水站点稀少且分布不均，且现有站点干旱监测资料空间代表性不足，利用遥感降水产品具有覆盖面广、空间分辨率高、时效性好等优点，对于新疆干旱监测研究具有重要意义，Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation(MSWEP)多源遥感降水融合产品在世界各地得到广泛应用。气候变暖背景下，新疆降水变率增加，干旱事件频发，以新疆106个气象站点资料为依据，在对MSWEP降水产品进行误差评估的基础上，结合标准化降水指数SPI，应用MSWEP遥感降水产品，对新疆1980—2021年间干湿变化、干旱事件及其基本特征进行研究。结果表明：(1) MSWEP与站点观测资料的相关性较高(>0.8)，MSWEP精度基本满足干旱监测需求；(2) 近42 a新疆干湿变化以变湿为主；(3) 1980年以来，干旱事件频发且特征各异。识别到13次较大干旱事件，1985—1987年发生的干旱事件为近42 a来最严重干旱事件，2009年5—10月发生的干旱事件为强度最高的短时干旱事件；(4) 干旱事件的持续时间、强度、严重度等特征各异，部分事件持续时间短但强度高，部分事件持续时间长但强度偏低。总之，MSWEP遥感降水产品为缺资料地区的干旱监测提供了重要数据支撑。

关键词：MSWEP；干旱监测；干旱事件；时空特征；新疆

干旱缺水是新疆主要气候特征。在全球增温背景下，新疆也发生了明显的升温现象，持续升温加剧了新疆降水的年际波动，导致干旱灾害频发，破坏生态环境，给人们的生产生活造成了巨大损失[1-3]。

根据干旱的发生发展情况及其影响，通常可分为降水不足导致的气象干旱、土壤水分不足引起的农业干旱、水资源不足引起的水文干旱和因水资源供需不平衡所造成的社会经济干旱[4]。从本质上讲气象干旱是其他3种类型干旱的起源[4-5]。气象干旱的表征形式很多，近半个世纪以来，国际上已有上百种干旱指数用于干旱的监测，每种干旱指数的适用范围和应用效果均有所不同。常用的气象干旱指数主要包括标准化降水指数(SPI)、帕尔默干旱强度指数(PDSI)、标准化降水蒸散指数(SPEI)等，大部分干旱指数不具有普适性，需输入多种参数进行计算，对数据的质量要求较高，计算过程复杂。其中，McKee等[6]提出的SPI仅需输入降水数据即可进行计算，计算方式简单、时间尺度灵活、能够较好地反映出不同地域之间的干旱状况。

传统的干旱研究，主要基于站点观测数据。新疆地处内陆干旱区，现有的常年观测降水站点多分布在平原、出山口处，荒漠区和山区站点稀少，难以满足实时、大范围旱情监测。而降水空间插值技术众多且精度不一，插值精度依赖于站点密度、降水强度、地形等因素，现有降水插值产品空间分辨率较低，在实际干旱监测应用中难以体现干旱时空细节特征。随着遥感技术的不断发展，高时空分辨率卫星遥感降水产品被广泛运用于水文研究，有效弥补了传统监测耗时耗力及站点观测数据不足等问题，具有覆盖范围广、数据获取时效性强等优点。现有的卫星遥感降水产品众多，各产品性能存在空间差异性。干旱监测需长序列的降水数据，当前大多遥感降水产品时间尺度不足。其中，经过地面站点纠正的Multi-Source Weighted-Enselble Precipitation(MSWEP)是一种将实测降水数据、卫星观测数据、再分析数据优点融合的降水产品，也是为数不多能够提供长达40 a时间序列降水资料的遥感降水产品，空间分辨率可以达到0.1°，在我国许多地区得

收稿日期：2022-04-02；　**修订日期：**2022-05-23
基金项目：国家自然科学基金(42001363)；自治区重点实验室开放课题(2018D04027)
作者简介：王姣妍(1968-)，女，硕士，教授级高级工程师，主要从事干旱区水文水资源研究. E-mail: wjymiaoling@126.com

到应用并具有较好的精度,可以满足SPI干旱指数的计算需要,有效弥补了新疆观测站点空间分布代表性较差的问题[7-8]。

新疆多年平均降水量157.7 mm,不足全国平均降水量的1/4,是全国最干旱的区域之一。干旱频发造成农作物大面积减产甚至绝收。根据新疆水利厅[9]统计数据,以2008年为例,旱情导致新疆农作物受旱面积高达8.13×10^5 hm^2,成灾面积4.27×10^5 hm^2,绝收8.8×10^4 hm^2,旱灾损失总计2.31×10^9元。新疆属于典型的大陆性干旱气候区和生态脆弱区,对全球气候变暖尤为敏感。胡文峰等[10-11]研究指出,新疆降水和气温整体呈波动上升趋势;施雅风等[12]指出新疆由暖干向暖湿转变;谢培等[13]基于降水距平和SPI分析表明,新疆正经历增温趋湿的过程;轩俊伟等[14]利用标准化降水蒸散指数(SPEI)对新疆干旱特征进行了分析,提出新疆有可能会重新进入干旱期;张乐园等[15]基于SPEI分析了中亚等地区干旱特征;王乃哲等[16]利用干旱侦测指数(RDI)分析了新疆5个地区季尺度和年尺度的干旱特征;丁严等[17]基于CEEMD的LSTM和ARIMA模型以新疆为例进行了干旱预测适用性研究;尹文杰等[18]采用PDSI指数分析了柴达木盆地干旱时空变化特征;王素萍等[19]研究了多种干旱指数在中国北方的适用性及其差异;贺敏等[20]对基于多源数据的干旱监测指数进行了对比研究;王舒等[21]研究了4种干旱指数在新疆的适用性问题;卢新玉等[22]对新疆多源降水产品进行了研究;叶尔克江·霍依哈孜等[23]在县尺度内进行了春季和夏季的气象干旱特征分析。大多数学者的研究是基于观测站点数据,由于新疆站点数目有限,易造成偏差。故本文基于MSWEP遥感站点融合产品,选取标准化降水指数SPI,分析新疆干旱时空特征,研究结果可为新疆干旱的监测、预警以及抗旱减灾提供技术支撑。

1 研究区概况

新疆地处亚欧大陆中部,地理坐标位于73°40′~96°23′E,34°25′~49°10′N。全区地貌形态多样,北有阿尔泰山,南有昆仑山,天山横贯中部,它们将新疆分为南、北两大盆地,北为准噶尔盆地,南为塔里木盆地,呈现"三山夹两盆"的地理特征,构成了山系与山系相连,盆地与山系相间的独特地貌。塔里木盆地是全国最大的内陆盆地,盆地中部的塔克拉玛干沙漠,是中国最大、世界第二大流动沙漠;准噶尔盆地是中国第二大盆地,中部的古尔班通古特沙漠是中国第二大沙漠。

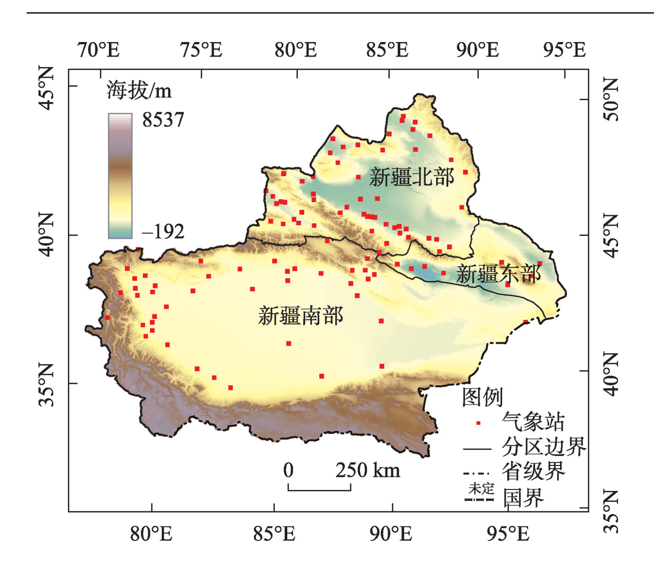
新疆地形总体呈南高北低,西高东低。北部的阿尔泰山西部山脊线平均海拔高程3000 m,向东逐渐降至3000 m以下;天山西部汗腾格里峰多在5000 m以上,向东渐低,至甘肃交界处呈低山丘陵景观;喀拉昆仑山、昆仑山西部平均高度为6000 m,向东渐低至3000~4000 m高度;塔里木盆地西高东低,海拔1200~1400 m,罗布泊降至780 m;准噶尔盆地高度由东北部的800~1000 m,向西南至艾比湖降至179 m。

新疆属于典型大陆性干旱气候,蒸发强烈,降水稀少。平原区年蒸发量大于1000 mm,塔里木盆地中心大于2000 mm,而多年平均降水量仅157.7 mm。年平均气温北疆平原区多在3.7~7.7 ℃,南疆平原区多在10~13 ℃,全疆极端最高气温为50.5 ℃(吐鲁番),极端最低气温-51.5 ℃(富蕴)。新疆75.5%的面积降水量小于200 mm,属于干旱区,12.9%的面积为200~400 mm的半干旱。南疆和东疆除少量高山区为半湿润区,绝大多数地区为干旱区,是我国干旱程度最为严重的地区。本研究以天山为界将新疆划分南北疆,天山以北为北疆,以南为南疆(图1)。考虑到新疆东部吐哈盆地与南北疆的气候差异,将吐哈盆地单独划分为东疆。北疆占全疆面积的25%,南疆占全疆面积的66%,东疆占全疆面积的9%。

2 数据与方法

2.1 数据来源

2.1.1 *气象站点数据* 所用站点月降水数据来自国家气象信息中心(NMIC)和中国气象局(CMA,http://data.cma.cn/en),站点空间分布见图1。共选取106个站点1980—2021年的月降水资料用于验证MSWEP降水产品的精度。本研究中使用的所有站点降水数据均经过严格的质量控制,先后进行了极值筛查、内部一致性检查、空间一致性筛选、缺失值检查[24]。从图1站点的空间分布可以看出,站点分布并不均匀,天山南北坡、阿尔泰山、帕米尔高原地区站点相对密集,而塔里木盆地荒漠区、古尔班通



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为GS(2019)3333号，对底图边界无修改。下同。

图1 研究区地形及站点分布图

Fig. 1 Study region and the distribution of observatories

古特沙漠地区站点分布较少，南部昆仑山区几乎无站点分布。考虑到新疆站点分布的空间异质性大、代表性不足等情况，因此本文站点资料仅用于MSWEP降水产品的精度评价。

2.1.2 MSWEP降水产品 MSWEP融合了TRMM、GSMaP、CMORPH等多种遥感降水数据资料，同时使用了Gridsat B1红外数据、欧洲中尺度预测数据(ECMWF)、日本55 a再分析数据(JRA-55)、全球降水气候中心(GPCC)产品和WorldClim V2.0逐月气候数据集。基于全球历史气候逐日观测网(GHCN-D)和全球逐日地表降水概要(GSOD)观测数据，MSWEP降水产品对融合后的降水误差进行了纠正得到最终的降水数据[25]。本研究使用的1980年1月至2021年12月期间的逐月数据来自MSWEP官方网站(http://www.gloh2o.org/mswep/)。

2.2 方法

2.2.1 统计评价指标 基于相对误差RB、相关系数CC和比例均方根误差FRMSE作为MSWEP降水产品的误差评价指标。计算公式[8]如下：

$$\mathrm{RB} = \sum_{i=1}^{N}(S_i - G_i) \Big/ \sum_{i=1}^{N}(G_i) \times 100 \quad (1)$$

$$\mathrm{CC} = \left[\sum_{i=1}^{N}(S_i - \bar{S})(G_i - \bar{G})\right] \Big/ \left[\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(S_i - \bar{S})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(G_i - \bar{G})^2}\right] \quad (2)$$

$$\mathrm{FRMSE} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(S_i - G_i)^2} \Big/ \bar{G} \quad (3)$$

式中：S为遥感降水产品MSWEP；G为站点观测数据；i代表样本序列号；N为总样本量。

2.2.2 Sen斜率和改进型MK趋势分析 干旱趋势变化是干旱监测的重要指标，本研究基于Sen斜率[26]和改进型的Mann-Kendall(MK)显著性检验方法，分析新疆及其分区的干湿变化趋势。基于MK趋势分析法[27]提出了改进型MK趋势分析法(MMK)。MMK方法在有效或等效样本大小的基础上，在原始方差计算中增加校正因子避免数据自相关的影响。大量研究证明，在气象水文学相关研究中，MMK比原始MK方法更加可靠和稳定[28]。MMK检验已被广泛应用于干旱趋势分析 中[29-32]。

2.2.3 标准化降水指数SPI 标准化降水指数(SPI)由McKee等[6]于1993年提出。SPI计算简单，仅依据降水资料即可定量描述某地区的气象干旱状况，具有灵活的时间尺度和良好的空间可比性[33]。SPI已成为应用最广泛的干旱监测指标[34]。考虑到可收集到的实测站点数据无法满足标准化降水蒸散指数SPEI[35-36]等复杂干旱指数中蒸散发部分的计算要求，本文选用SPI干旱指数开展干旱监测研究。SPI计算主要包含以下步骤：(1)确定描述长期降雨时间序列的合适概率密度函数。(2)根据所需时间尺度，选择降水观测序列的基准时间并计算相应时间尺度的降水时间序列。(3)将累积概率拟合到降水时间序列中的相应时间尺度。(4)将逆正态(高斯)函数应用于累积概率分布函数生成SPI时间序列数据[6]。SPI基本计算公式如下：

$$\mathrm{SPI} = S\frac{t - (c_2 t + c_1)t + c_0}{[(d_3 t + d_2)t + d_1]t + 1.0}, t = \sqrt{\ln\frac{1}{H(x)^2}} \quad (4)$$

$$G(x) = \frac{1}{\beta^{\gamma}\Gamma(\gamma)_0}\int_0^x x^{\gamma-1}\mathrm{e}^{-x/\beta}\mathrm{d}x, x > 0, \Gamma(\gamma) = \int_0^{\infty} x^{\gamma-1}\mathrm{e}^{-x}\mathrm{d}x \quad (5)$$

式中：x为降水量；β和γ分别表示Γ函数的比例因子和形状因子；S表示相关系数；c_0，c_1，c_2和d_1，d_2，d_3为计算参数，其值分别为c_0=2.515517，c_1=0.802853，c_2=0.010328，d_1=1.432788，d_2=0.189269，d_3=0.001308。$G(x)$为降水概率分布函数，当$G(x) > 0.5$时$H(x)$=1−$G(x)$且S=1；$G(x) \leq 0.5$时，$H(x)$=$G(x)$且S=−1。

有研究表明，3个月时间尺度的SPI(SPI3)能够较好地反映当地下垫面的土壤水分亏缺情况，其与地表自然植被、农作物等的生长状况具有较高的相关性[37-39]。因此，本研究选择3个月时间尺度的SPI(SPI3)作为干旱研究指标，SPI值域范围为[−3,3]，

其值为正代表湿润,其值为负代表干旱。根据SPI值可以将干湿状况分为8类[6](表1)。

表1 SPI分类

Tab. 1 Categories of SPI

SPI值	干湿分类	发生概率/%
>2	极端湿润	2.3
1.5~2	重度湿润	4.4
1~1.5	中度湿润	9.2
0~1	轻微湿润	34.1
−1~0	轻微干旱	34.1
−1.5~−1	中度干旱	9.2
−2~−1.5	重度干旱	4.4
<−2	极端干旱	2.3

2.2.4 干旱事件识别与特征定量化描述 基于游程理论[40]识别干旱事件,并对干旱事件的开始和结束时间、持续时间、强度、严重度和峰值等干旱特征指标进行定量化分析。为保证对不同类型干旱事件(如低强度长时间的干旱事件和短时间高强度的干旱事件)的识别,本文仅关注持续时间较长且干旱峰值较高的干旱事件。因此,本文将干旱事件定义为连续3个月或以上处于干旱状态(SPI<0)且期间SPI最小值≥−1[8]。SPI值开始处于负值和SPI值恢复为正值的时间定义为干旱事件的开始和结束时间,干旱持续时间为处于干旱状态的干旱月数;干旱严重度表达干旱事件的总严重程度,定义为干旱期间SPI累加值(公式4);干旱强度衡量干旱事件的瞬时严重程度,定义为干旱严重度与干旱持续时间的比值(公式5);干旱峰值为干旱期间SPI所达到的最小值,即最干旱月的SPI值,对应月份为干旱峰值时间(公式6)。本文基于MSWEP降水数据逐像元识别干旱事件,为分析新疆地区干旱特征的空间分布,将干旱事件特征指标进行平均处理(公式6~公式9)。干旱事件及其基本特征见图2。

$$MDD = \frac{\sum_{i=1}^{N} DD_i}{N} \tag{6}$$

$$MDS = \frac{\sum_{j=1}^{N} DS_j}{N}, DS = \sum_{i=1}^{DD} \left| \mathrm{SPI}_i \right| \tag{7}$$

$$MDI = \frac{\sum_{j=1}^{N} DI_j}{N}, DI = \frac{\sum_{i=1}^{DD} \left| \mathrm{SPI}_i \right|}{DD} \tag{8}$$

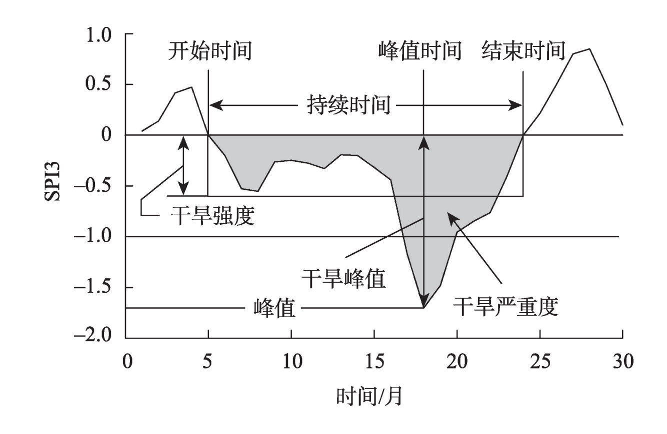


图2 干旱事件及其基本特征示意图

Fig. 2 Drought events and their characteristics

$$MDP = \frac{\sum_{j=1}^{N} DP_j}{N}, DP = \max_{1 \leq i \leq DD} \left| \mathrm{SPI}_i \right| \tag{9}$$

式中:DD、DS、DI和DP分别为干旱事件的持续时间、严重度、强度和峰值;MDD、MDS、MDI和MDP为研究时间段内所有干旱事件的平均持续时间、平均严重度、平均强度和平均峰值;i代表干旱月;SPI_i表示i个月的SPI值;N为研究时间段内识别到的干旱事件的总个数;j为单个干旱事件。

3 结果与分析

3.1 MSWEP数据验证

本部分内容基于站点资料对MSWEP产品进行精度评价。(1)在新疆全区、新疆北部、南部和东部分别提取站点所在位置的MSWEP月降水量。(2)在新疆全区和3个分区分别计算站点资料和MSWEP的空间平均值,得到1980年1月至2021年12月的降水时间序列对。(3)基于空间平均时间序列对构建散点图并计算其相关性、相对误差百分比和比例均方根误差。

从图3可以看出,MSWEP在新疆全区整体精度良好,相关系数达到0.86,图3a中散点大多位于1:1线的上方,线性拟合线与1:1线处于近似平行状态,相对误差RB为30.94%,FRMSE为0.37,说明MSWEP在新疆存在一定程度的降雨高估现象,且高估误差以系统误差为主。从分区角度来看,图3c和图3d散点图中线性拟合线均位于1:1线的上方且近似平行,说明降雨高估现象主要发生在南疆和东疆地区。MSWEP降水产品在北疆地区表现出高估低强度降水但低估高强度降水,且整体处于降水低

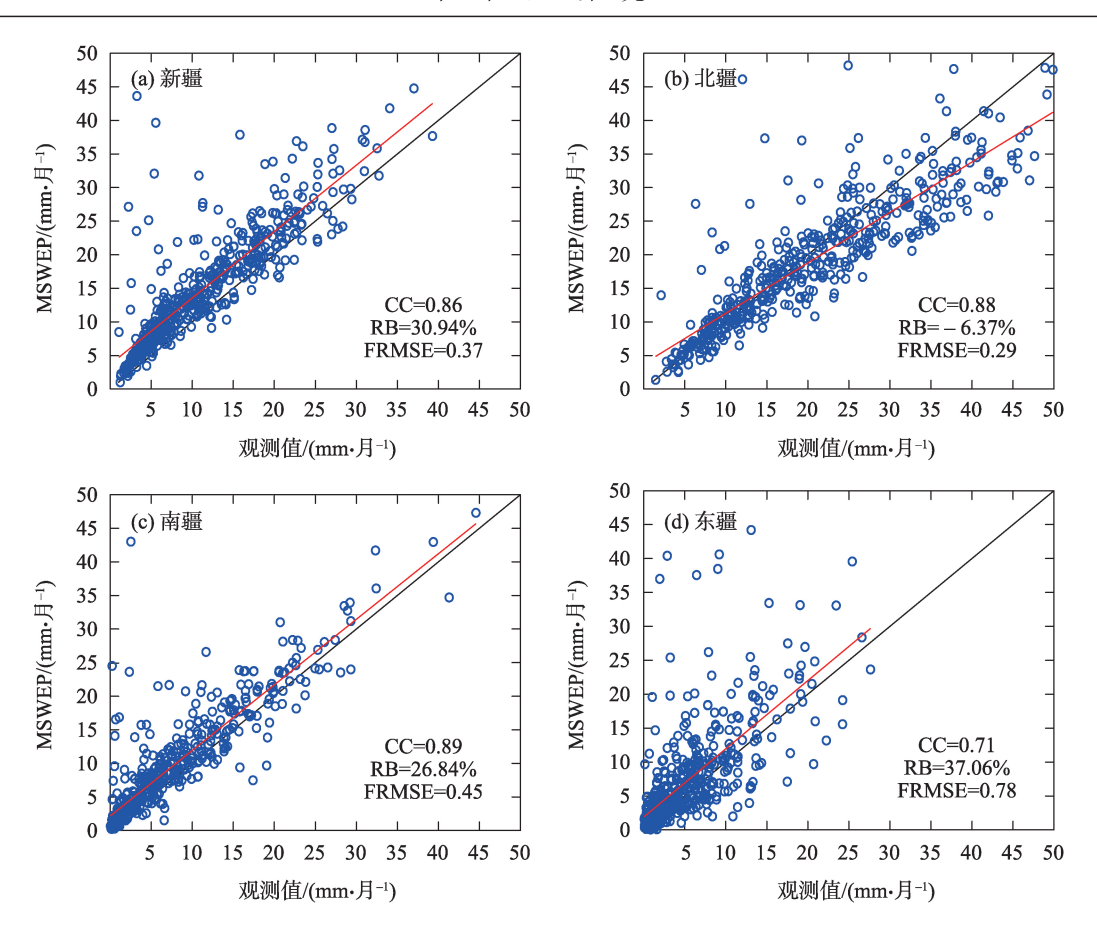


图3 新疆及其分区空间平均MSWEP降水数据与观测站数据的相关性散点图

Fig. 3 Scatterplots of domain-averaged precipitation of MSWEP and station in Xinjiang and its subregions

估状态(RB=-6.37%)。从图3d可以看出,MSWEP在东疆表现较差,相关系数为0.71,降水高估达37.06%,FRMSE为0.78。这与该地区降水量基数较小,雨量监测站分布稀疏有关。总体来看,MSWEP在新疆各地区的表现较为满意,月降水相关性达到0.7以上,基本满足遥感干旱监测应用的需求,这与Guo等[8]评价结果基本一致。

3.2 干旱趋势分析

基于3个月尺度的SPI指数(SPI3)结合Sen斜率和改进型MK检验的方法分析1980—2021年间干湿整体变化态势。从图4可以看出,新疆约94.4%的区域在1981—2021年期间呈现变湿趋势,79%的地区呈现显著性变湿趋势。仅有不足6%的区域呈现不显著变干,其主要集中在新疆南部的塔里木荒漠地区。变湿幅度较大的区域主要分布在阿尔泰山地区,天山地区和喀喇昆仑山北部地区。新疆北部和新疆东部超99%的区域呈现变湿迹象。

在区域尺度上,基于区域平均降水数据计算SPI3干旱指数并分析新疆及3个分区的时间情况(图4)。1980—2021年期间,新疆整体变湿趋势明显,斜率为0.0024(图5a)。北疆、南疆和东疆地区整体变湿趋势明显(图5b,图5c,图5d),这与图4空间分布情况一致。自2013年以来,变湿趋势有所加剧。

3.3 干旱事件空间特征分析

为了探究新疆干旱事件及其基本特征,基于SPI3和游程理论逐像元提取干旱事件,并基于此逐像元计算干旱事件的个数及其特征(严重度、强度、峰值)的平均情况,结果如图6所示。图6a为1980—2021年间识别到的干旱事件频次,频次越高代表42 a间发生的干旱次数越多。从图中还可以看出,新疆北部阿勒泰东部地区、准噶尔西部迎风坡干旱发生频次较高;新疆南部中天山南坡的中部地区和塔里木盆地荒漠区的大部分地区干旱发生频次较高。以上地区在过去42 a间干旱发生次数最高可达30余次。新疆东部、新疆北部的天山北坡、喀喇昆仑山和昆仑山北部地区干旱发生频次较低,42 a间发生干旱多在15次以下。

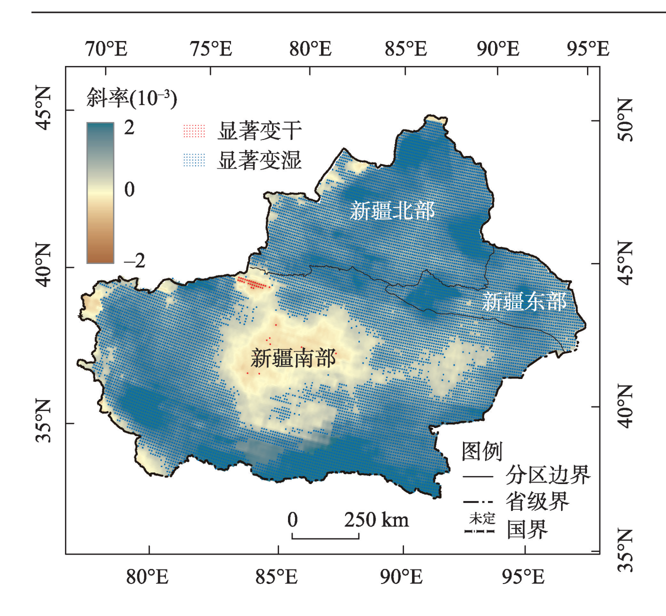


图4　SPI3在1980—2021年间变化趋势分布

Fig. 4　Trend of SPI3 from 1980 to 2021

图6b为42 a间识别到的干旱事件的平均持续时间，即所有干旱事件的平均干旱月数。从图中可以看出，新疆北部的阿尔泰山南麓、天山北坡和古尔班通古特沙漠东侧发生干旱的平均持续时间较长；新疆南部的喀喇昆仑山和昆仑山西北部地区的干旱持续时间也较长，干旱平均持续时间为10余个月。

干旱严重度用于衡量干旱事件总体严重情况，受干旱持续时间和干旱强度的影响。图6c给出了42 a间所有干旱事件的平均严重度空间分布情况。从图中可以看出，干旱持续时间较长的地区大多严重度较高，比如新疆北部的阿尔泰山南麓地区、新疆南部的帕米尔高原地区、喀喇昆仑山地区、昆仑山北坡西部地区；说明这些地区干旱严重度主要受干旱持续时间较长的影响。值得注意的是天山西部地区和昆仑山北部中段地区同样呈现出干旱严重度高的情况，说明这些地区的干旱严重度主要受高强度影响（图6d）。

3.4　基于区域平均的典型干旱事件

基于新疆区域平均降水计算得到SPI指数，结合游程理论方法识别新疆全区1980—2021年间发生的干旱事件，并对其持续时间、强度、严重度、峰值等基本特征进行量化。基于3个月尺度的SPI干旱指数，共识别到13次干旱事件，干旱事件基本特征见表2。

根据干旱持续时间长短、干旱严重度高低和干旱强度高低选出4个典型干旱事件逐一分析。典型干旱事件1为干旱持续时间最长且干旱严重度最高的干旱事件。干旱发生于1982年11月，历时达53个月，于1985年9月达到峰值，SPI绝对值达2.79，处于极端干旱状态，1987年3月整体干旱状况恢复到正常水平，此次干旱事件的总严重度达45.08。图7a为1985年9月新疆区域干旱空间分布情况。图中

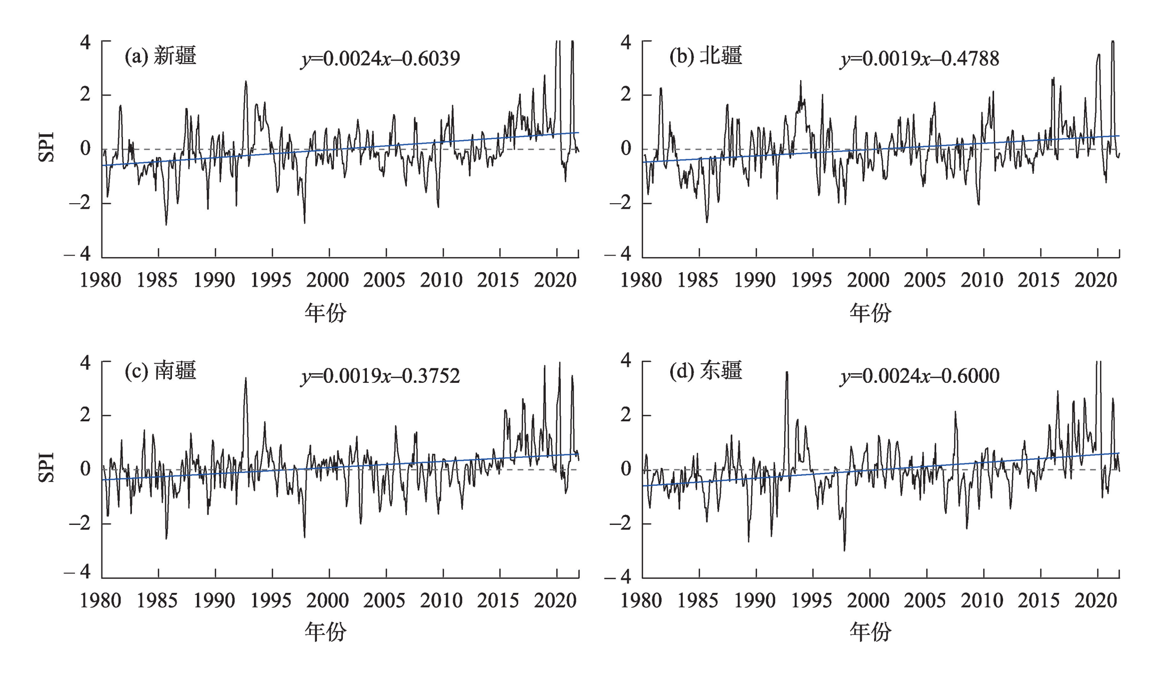


图5　新疆及其分区3月尺度SPI（SPI3）时间变化趋势

Fig. 5　Temporal change in three-month SPI (SPI3) in Xinjiang and its subregions

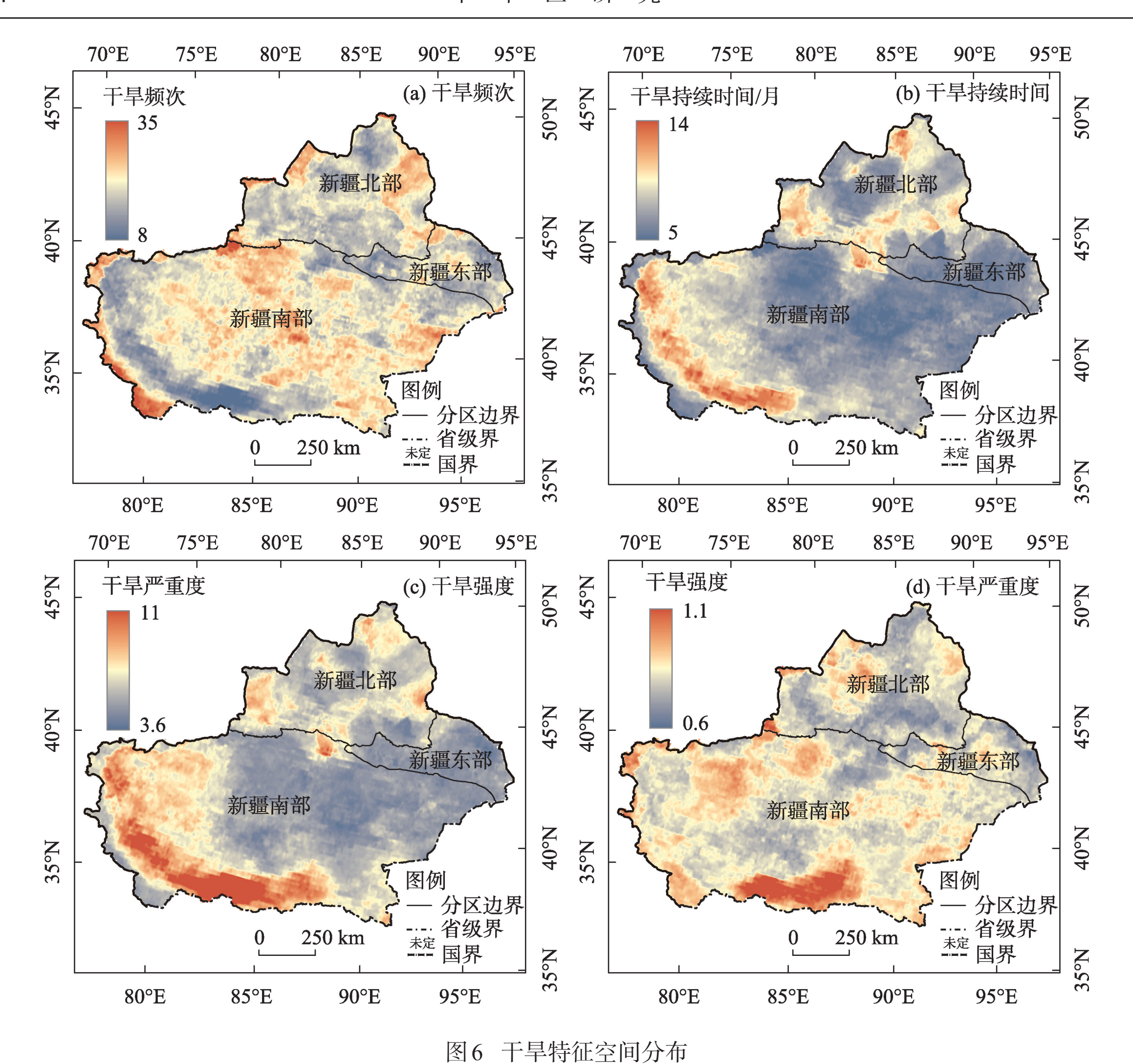


图6 干旱特征空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of drought characteristics

表2 新疆地区典型干旱事件及其基本特征

Tab. 2 Typical drought events in Xinjiang and their characteristics

典型干旱事件	开始时间/年-月	结束时间/年-月	峰值时间/年-月	持续时间/月	强度	峰值	严重度
	1980-03	1981-06	1980-07	16	0.55	1.76	8.79
典型干旱事件1	1982-11	1987-03	1985-09	53	0.85	2.79	45.08
	1988-08	1989-07	1989-05	12	0.74	2.21	8.88
	1990-10	1991-07	1991-07	10	0.36	1.02	3.64
	1991-09	1992-05	1991-11	9	0.50	2.10	4.53
典型干旱事件2	1995-03	1995-08	1995-06	6	1.09	1.59	6.53
	1996-10	1998-04	1997-11	19	0.92	2.73	17.43
	2001-02	2001-08	2001-05	7	0.56	1.05	3.89
典型干旱事件3	2003-12	2005-04	2004-10	17	0.39	1.01	6.70
	2006-04	2007-06	2006-10	15	0.51	1.35	7.69
	2007-10	2009-01	2008-07	16	0.64	1.60	10.30
典型干旱事件4	2009-05	2009-10	2009-08	6	1.18	2.14	7.09
	2020-06	2021-02	2020-10	9	0.51	1.19	4.63

注:加横线部分表示典型干旱事件。

显示，新疆97%的区域处于干旱状态，天山地区、南疆西南部和东疆大部地区SPI值＜-2，处于极端干旱状态，极端干旱面积占新疆总面积的36%。Mahmood等[38]研究指出，1983—1986年期间新疆发生了极端干旱事件，干旱主要集中在新疆西部和天山地区，其研究结论与本研究结果基本一致。

典型干旱事件2为所有干旱事件中强度最高的干旱事件，其强度值达到1.09。发生在1995年3月至1995年8月，持续时间为6个月，干旱严重度仅为6.53，但干旱强度达1.09。此类持续时间短但强度高的干旱事件对生态系统和植被的影响有时甚至超过长时间低强度的干旱事件。图7b为该干旱事件最严重月份6月的SPI分类分布图。从图中看出，约89%的区域处于干旱状态，其中8%左右的区域处于极端干旱状态，这些区域主要分布在天山西部、中部地区和羌塘无人区中段。除阿尔泰山南麓地区和帕米尔高原地区外，其他区域均受到此次干旱事件的影响。塔里木荒漠区中部、北疆北部受旱相对较轻，以轻微干旱和中度干旱为主。

典型干旱事件3属于持续时间较长但干旱强度较低的干旱事件。该干旱事件于2003年12月开始，结束于2005年4月。干旱强度仅为0.39，持续时间达17个月，严重度达6.70。Li等[39]研究指出，2004年为新疆的典型干旱年，新疆大部分区域均在一定程度上受到干旱的影响。2004年10月为该干旱事件最严重月，新疆80%的区域处于干旱状态，但其强度不高，以轻微干旱、中度干旱为主(图7c)。干旱最严重月SPI空间分布显示，羌塘无人区西段、天山东部地区受旱较为严重，其他区域干旱分布广泛，但强度较低，以轻微干旱和中度干旱为主。新疆水利厅[9]统计2004年发生15 a来最为严重的旱灾，全区作物严重受旱面积一度发展到33.3×

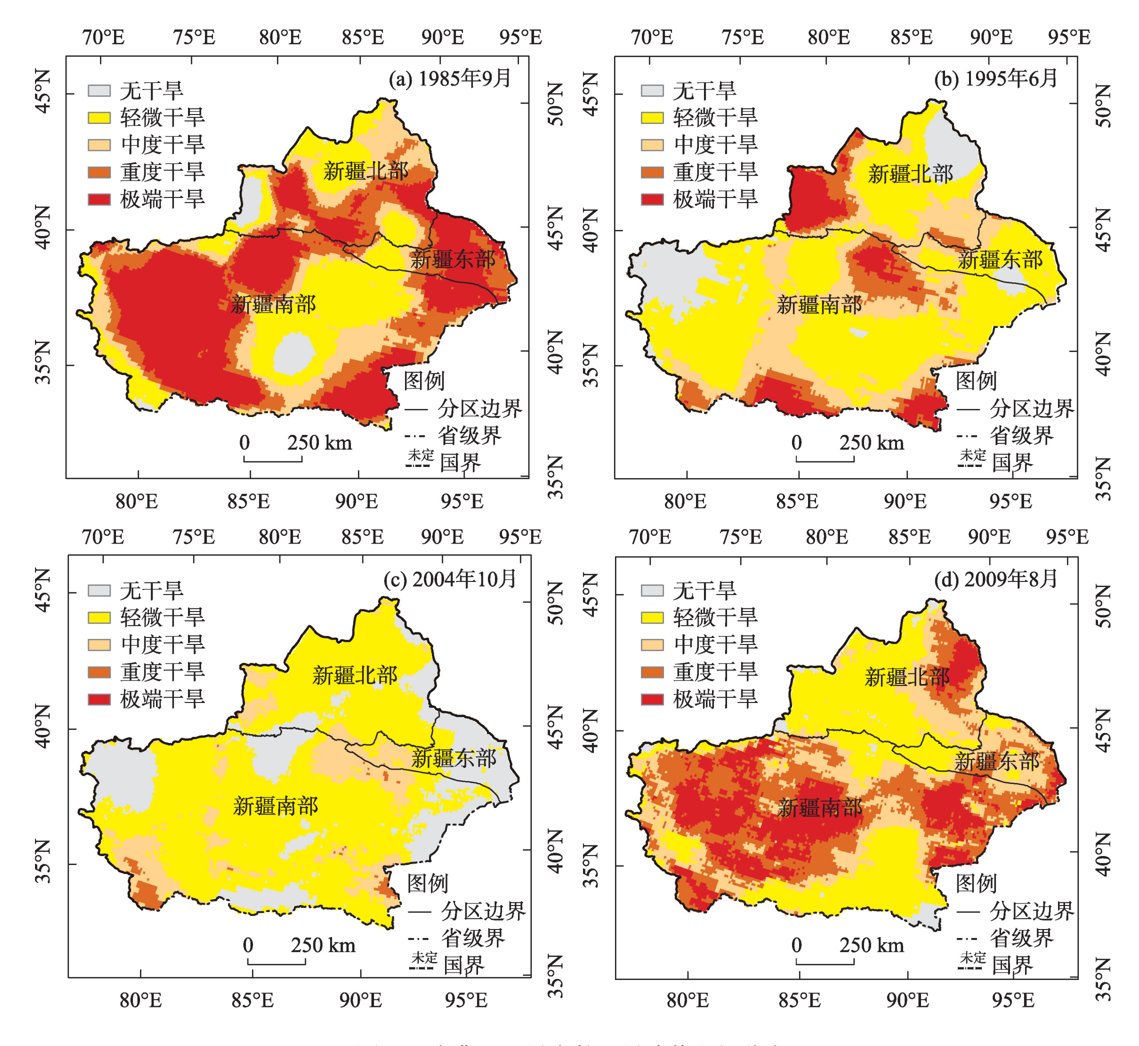


图7　4次典型干旱事件干旱峰值空间分布

Fig. 7　Spatial distribution of SPI3 for four typical drought events

10^4 hm^2。

典型干旱事件4开始于2009年5月结束于2009年10月。从表2可以看出,该干旱事件持续6个月,干旱强度较高,其值为1.18,干旱总严重度7.09。本次干旱事件属于典型的短时高强度干旱类型。图7d为2009年8月SPI干旱等级空间分布图,从图中可以看出,该月干旱覆盖新疆98%以上的区域,重度和极端干旱面积占比达25%和19%,整体来看,南疆地区受旱较为严重,塔里木荒漠区大部受到重度和极端干旱等级的影响;北疆地区干旱主要集中于阿尔泰山南麓地区;同时,东疆吐哈盆地以中度和轻微干旱为主。Yao等[40]研究新疆干旱时指出,2009年干旱属于低强度低影响的干旱事件,主要影响新疆的南部地区。新疆水利厅[9]统计2009年全区农作物因旱受灾面积49.9×10^4 hm^2,其中绝收面积1.83×10^4 hm^2,严重干旱草场面积达597×10^4 hm^2,16.5×10^4万人和37.8×10^4万头(只)牲畜饮水受到严重影响。其中喀什、克州、阿克苏、吐鲁番、哈密、和田地区等旱情较为严重。

4 讨 论

新疆气象站点稀少且空间分布不均,尤其是在塔里木河荒漠区、羌塘无人区等区域几乎无观测台站分布。作为气候变化敏感区和生态系统脆弱区,新疆的干湿变化与干旱特征一直备受关注,仅依赖观测站点进行的干旱监测难以有效表达干湿变化和干旱特征的空间分布。遥感数据具有空间覆盖范围广、时效性好等优点,能有效弥补站点资料空间代表性不足的缺陷。随着遥感数据的不断积累,部分遥感降水反演产品时序长度已达到气候应用研究的要求。本文利用站点观测降水数据对MSWEP长时序多源融合降水产品进行验证,充分利用其空间覆盖范围广、延时低等特点,识别了近42 a覆盖全疆的干旱事件,并定量化分析其时空特征。研究结果表明,MSWEP与站点实测资料的相关性较高(>0.9),与Guo等[8]的研究结果一致。1981—2020年间新疆整体处于轻微变湿的结果与姚俊强等[11]的结果一致。值得一提的是,虽然MSWEP与站点资料具有较高的相关性,但并不能说明可直接替代实测站点数据,仅仅能够提供空间覆盖完整的干旱监测资料。新疆站点数量少且分布不均会对MSWEP验证结果带来一定的影响。随着新疆降水站网的不断完善,以及遥感反演技术和实测降水与遥感融合技术的不断改进,新疆的干旱监测精度将得到不断提高。本文作者将持续关注地面站点与遥感产品的融合研究与应用。

5 结 论

本研究旨在利用MSWEP遥感降水产品对1980—2021年间新疆干旱发展趋势和干旱事件时空特征展开分析。首先,基于气象站点降水资料对MSWEP遥感降水产品进行验证,结果表明MSWEP能够满足干旱监测需求。其次,基于MSWEP产品和SPI干旱指数发现新疆地区近42 a干湿变化呈现整体变湿趋势。本研究对干旱事件进行了定义并对干旱事件的特征进行了量化分析。研究结果表明新疆天山南部、南疆大部和北疆东部发生干旱频次较高;阿尔泰山南坡、天山北坡和南疆西南部山区干旱平均持续时间较长,严重度较高。在新疆共识别到13次较为严重的干旱事件。其中,以1982年11月至1987年3月期间的干旱事件最为严重,持续时间也最长;2009年5月至10月和1995年3月至8月发生了近42 a来强度最高的短时干旱事件,其强度分别为1.18和1.09。干旱事件之间特征各异,有的持续时间长但强度较低,有的持续时间短但强度高。本文结论能够为新疆地区干旱监测及旱灾防灾减灾提供科学参考。

致谢:本研究得到了郭浩老师团队和刘英老师大力支持,在此表示衷心的感谢!

参考文献(References):

[1] 木沙·如孜, 雷晓云, 白云岗, 等. 塔里木河流域旱灾发生规律[J]. 干旱区研究, 2014, 31(2): 274-278. [Musha Ruzi, Lei Xiaoyun, Bai Yungang, et al. Historical drought disasters occurred in the Tarim River Basin[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(2): 274-278.]

[2] 唐湘玲, 吕新, 欧阳异能, 等. 1978—2014年新疆农作物受极端气候事件影响的灾情变化趋势分析[J]. 中国农学通报, 2017, 33(3): 143-148. [Tang Xiangling , Lv Xin , Ouyang Yineng , et al. Disaster trend of crops affected by extreme climatic events in Xinjiang during 1978-2014[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(3): 143-148.]

[3] 吴美华, 王怀军, 孙桂丽, 等. 新疆农业气象灾害成因及其风险分析[J]. 干旱区地理, 2016, 39(6): 1212-1220. [Wu Meihua,

Wang Huaijun, Sun Guili, et al. Formation and risk analysis of meteorological disasters in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(6): 1212-1220.]

[4] Dracup J A, Lee K S, Paulson E G. On the definition of droughts [J]. Water Resources Research, 1980, 16(2): 297-302.

[5] 张强, 张良, 崔显成, 等. 干旱监测与评价技术的发展及其科学挑战[J]. 地球科学进展, 2011, 26(7): 763-778. [Zhang Qiang, Zhang Liang, Cui Xiancheng, et al. Progresses and challenges in drought ssessment and monitoring[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(7): 763-778.]

[6] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]//Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology, Anaheim, California, 1993.

[7] 彭振华, 李艳忠, 余文君, 等. 遥感降水产品在中国不同气候区的适用性研究[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(7): 1296-1311. [Peng Zhenhua, Li Yanzhong, Yu Wenjun, et al. Research on the applicability of remote sensing precipitation products in different climatic regions of China[J]. Journal of Geo-Information Science, 2021, 23(7): 1296-1311.]

[8] Guo H, Li M, Nzabarinda V, et al. Assessment of three long-term satellite-based precipitation pstimates against ground observations for drought characterization in northwestern China[J]. Remote Sensing, 2022, 14(4): 828. https://doi.org/10.3390/rs14040828.

[9] 新疆维吾尔自治区水资源公报. 新疆水资源公报(2002-2009) [EB/OL]. http:/slt.Xinjiang.gov.cn/slt/slnb/list_ej.shtml. [Water Xinjiang Communique. Xinjiang Water Resources Bulletin(2002-2009) [EB/OL]. http:/slt.Xinjiang.gov.cn/slt/slnb/list_ej.shtml.]

[10] 胡文峰, 陈玲玲, 姚俊强, 等. 近55年来新疆多时间尺度干旱格局演变特征[J]. 人民珠江, 2019, 40(11): 1-9, 27. [Hu Wenfeng, Chen Lingling, Yao Junqiang, et al. Evolution characteristics of drought patterns at multiple timescales in Xinjiang for last 55 years[J]. Pearl River, 2019, 40(11): 1-9, 27.]

[11] 姚俊强, 李漠岩, 迪丽努尔·托列吾别克, 等. 不同时间尺度下新疆气候"暖湿化"特征 [J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 333-346. [Yao Junqiang, Li Moyan, Dilinuer Tuoliewubieke, et al. The assessment on "warming-wetting" trend in Xinjiang at multi-scale during 1961-2019[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 333-346.]

[12] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-164. [Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China[J]. Quaternary Science, 2003, 23(2): 152-164.]

[13] 谢培, 顾艳玲, 张玉虎, 等. 1961-2015年新疆降水及干旱特征分析[J]. 干旱区地理, 2017, 40(2): 332-339. [Xie Pei, Gu Yanling, Zhang Yuhu, et al. Precipitation and drought characteristics in Xinjiang during 1961-2015[J]. Arid Land Geography, 2017, 40 (2): 332-339.]

[14] 轩俊伟, 郑江华, 刘志辉. 基于SPEI的新疆干旱时空变化特征 [J]. 干旱区研究, 2016, 33(2): 338-344. [Xuan Junwei, Zheng Jianghua, Liu Zhihui. SPEI-based spatiotemporal variation of drought in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(2): 338-344.]

[15] 张乐园, 王弋, 陈亚宁. 基于SPEI指数的中亚地区干旱时空分布特征[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 331-340. [Zhang Leyuan, Wang Yi, Chen Yaning. Spatial and temporal distribution characteristics of drought in Central Asia based on SPEI index[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 331-340.]

[16] 王乃哲, 景元书, 徐向华, 等. RDI指数在新疆5个地区干旱监测的应用[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 99-107. [Wang Naizhe. Jing Yuanshu, Xu Xianghua, et al. Application of RDI index in drought monitoring of five regions in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 99-107.]

[17] 丁严, 许德合, 曹连海, 等. 基于CEEMD的LSTM和ARIMA模型干旱预测适用性研究——以新疆为例[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 734-744. [Ding Yan, Xu Dehe, Cao Lianhai, et al. Applicability of the LSTM and ARIMA model in drought prediction based on CEEMD: A case study of Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 734-744.]

[18] 尹文杰, 张梦琳, 胡立堂. 柴达木盆地干旱时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 387-394. [Yin Wenjie, Zhang Menglin, Hu Litang. Spatiotemporal variation of drought in the Qaidam Basin[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2): 387-394.]

[19] 王素萍, 王劲松, 张强, 等. 多种干旱指数在中国北方的适用性及其差异原因初探[J]. 高原气象, 2020, 39(3): 628-640. [Wang Suping, Wang Jinsong, Zhang Qiang, et al. Applicability evaluation of drough indices in northern China and the reasons for their differences[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(3): 628-640.]

[20] 贺敏, 宋立生, 王展鹏, 等. 基于多源数据的干旱监测指数对比研究——以西南地区为例[J]. 自然资源学报, 2018, 33(7): 1257-1269. [He Min, Song Lisheng, Wang Zhanpeng, et al. Evaluation of drought monitoring indices based on multi-source data in Southwest China[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(7): 1257-1269.]

[21] 王舒, 肖高翔. 4种气象干旱指数在新疆的适用性分析[J]. 人民长江, 2021, 52(9): 86-92, 100. [Wang Shu, Xiao Gaoxiang. Applicability analysis of four meteorological drought indices in Xinjiang [J]. Yangtze River, 2021, 52(9): 86-92, 100.]

[22] 卢新玉, 刘艳, 王秀琴, 等. 新疆地区多源降水融合试验[J].干旱区研究, 2020, 37(5): 1223-1232. [Lu Xinyu, Liu Yan, Wang Xiuqin, et al. Multisource precipitation data merging experiment in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(5): 1223-1232.]

[23] 叶尔克江·霍依哈孜, 阿帕尔·肉孜, 柳宏英, 等. 新疆木垒县近51年春、夏季气象干旱特征分析[J]. 湖北农业科学, 2021, 60 (14): 57-63. [Hoyhazi Erkejan, Ruzi Apar, Liu Hongying, et al. Analysis on the characteristics of spring and summer meteorological drought in Mulei county of Xinjiang in recent 51 years[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2021, 60(14): 57-63.]

[24] Shen Y, Xiong A Y, Wang Y, et al. Performance of high-resolution satellite precipitation products over China [J]. Journal of Geophysi-

cal Research : Atmospheres, 2010, 115(D2): 1-17.

[25] Beck H E, Wood E F, Pan M,et al. MSWEP V2 Global 3-Hourly 0.1° precipitation: Methodology and quantitative assessment[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2019, 100(3): 473-500.

[26] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63 (324): 1379-1389.

[27] Hamed K H, Rao A R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data [J]. Journal of Hydrology, 1998, 204(1-4): 182-196.

[28] Daufresne M, Lengfellner K, Sommer U. Global warming benefits the small in aquatic ecosystems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106 (31): 12788-12793.

[29] Huang Q Z, Zhang Q, Singh V P, et al. Variations of dryness/wetness across China: Changing properties, drought risks, and causes [J]. Global and Planetary Change, 2017, 155 : 1-12.

[30] Huang S Z, Chang J X, Leng G Y et al. Integrated index for drought assessment based on variable fuzzy set theory: A case study in the Yellow River basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2015, 527: 608-618.

[31] Joshi N, Gupta D, Suryavanshi S, et al. Analysis of trends and dominant periodicities in drought variables in India: A wavelet transform based approach[J]. Atmospheric Research, 2016, 182(15): 200-220.

[32] Merino A, López L, Hermida L, et al. Identification of drought phases in a 110-year record from western Mediterranean basin: Trends, anomalies and periodicity analysis for Iberian Peninsula [J]. Global and Planetary Change, 2015, 133: 96-108.

[33] Hong X G, Guo S L, Xiong L H, et al. Spatial and temporal analysis of drought using entropy-based standardized precipitation index: a case study in Poyang Lake basin, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2015, 122(3): 543-556.

[34] Li J Z, Wang Y X, Li S F, et al. A Nonstationary Standardized Precipitation Index incorporating climate indices as covariates[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120(23): 12082-12095.

[35] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I, et al. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration inde[J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.

[36] Beguería S, Vicente-Serrano S M, Reig F, et al. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: Parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring[J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(10): 3001-3023.

[37] Mahmood R, Li S, Khan B. Causes of recurring drought patterns in Xinjiang, China[J]. Journal of Arid Land, 2010, 2(4): 279-285.

[38] Li Z, Hao Z, Shi X, et al. An agricultural drought index to incorporate the irrigation process and reservoir operations: A case study in the Tarim River Basin[J]. Global and Planetary Change, 2016, 143: 10-20.

[39] Yao J, Zhao Y, Yu X. Spatial-temporal variation and impacts of drought in Xinjiang (Northwest China) during 1961-2015[J]. PeerJ, 2018, 6(e4926).

[40] Yevjevich V M. An Objective Approach to Definition and Investigations of Continental Hydrologic Droughts[M]. Fort Collins, Colorado: Colorado State University, 1967.

Study on spatiotemporal characteristics of drought in Xinjiang based on Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation multi-source merged precipitation product

WANG Jiaoyan

(Xinjiang Hydrological Bureau, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract: Meteorological stations in Xinjiang are sparse and unevenly distributed, resulting in drought monitoring based on in-situ observations in Xinjiang which are insufficient in spatial representativeness. Remote-sensed precipitation products have the advantages of wide coverage, high spatial resolution, and timeliness compared to data from stations. Thus, remote-sensed precipitation products are important for drought monitoring in Xinjiang with scarce in-situ observations. Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP) has been applied in various applications worldwide. With the foundation of global climate change, Xinjiang has experienced an increasing trend in the frequency of droughts and the variability of precipitation. This paper evaluates the accuracy of the MSWEP products using data from 106 observatories. Based on the Standardized Precipitation Index (SPI), MSWEP was adopted to study the temporal variations in dry/wet conditions, identify drought events, and study drought characteristics in Xinjiang from 1980 to 2021. The main results were as follows: (1) MSWEP was highly correlated with data from in-situ stations (>0.8), which supports its application in drought monitoring. (2) Xinjiang had become more humid in the studied period. (3) Thirteen severe drought events were identified since 1980. Among them, the one from 1985 to 1987 was the most severe, and the one from May-October, 2009, was the most intense. (4) Drought events have various features in duration, intensity, and severity. Some droughts were intense with a short duration, while others were long and more severe. Overall, MSWEP has a high potential for drought monitoring, especially for regions where ground-based observatories are scarce. Based on MSWEP, Xinjiang was found to experience a wetting trend and frequent drought events with different characteristics.

Keywords: MSWEP; drought monitoring; drought event; spatiotemporal characteristics; Xinjiang